

Reicht eine einzelne Mikrofonsonde für die trommelfellbezogene Audiometrie aus?

Sebastian Schmidt, Herbert Hudde

Institut für Kommunikationsakustik, Ruhr-Universität Bochum, 44780 Bochum, Deutschland,

Email: sebastian.schmidt@rub.de, herbert.hudde@rub.de

Einleitung

Der Schalldruck p_T im tympanomeatalen Winkel (TMW) ist als Bezugsdruck bei Messungen am menschlichen Gehör sehr gut geeignet, da er keine ausgeprägten Minima besitzt, sein Betrag im Vergleich zu anderen im Gehörgang auftretenden Signalen über der Frequenz glatt ist und er eine wohldefinierte Position besitzt. Durch den Bezug werden individuelle Einflüsse von Gehörgang, Pinna und Schallquelle ausgeblendet. Um p_T als Bezugsdruck nutzen zu können, muss dieser möglichst präzise bestimmt bzw. eingestellt werden. Dazu ist es notwendig, Messungen hinreichend nah am Trommelfell durchzuführen (Schmidt, Hudde, DAGA 2006). Eine direkte Messung im TMW ist aus praktischen Gründen nicht möglich. Da jedoch im Abstand gemessene Signale erheblich von der gesuchten Größe abweichen, ist es erforderlich, die Übertragungsfunktion des Drucks vom Messpunkt zum TMW zu schätzen und einzurechnen. Hierbei können Verfahren mit unterschiedlicher Sondenanzahl eingesetzt werden. Während eine Sonde bereits Aufschluss über die Impedanzminima des Abschlusses gibt, erlauben beispielsweise zwei Sonden eine genauere Schätzung der Impedanz. Es zeigt sich, dass die Anpassung eines sehr einfachen akustischen Modells des Restgehörgangs an die Messdaten einer einzelnen Mikrofonsonde bereits zu guten Ergebnissen führt. Um die Minima der gemessenen Drucksignale, aus denen das Übertragungsverhalten des Gehörgangs geschätzt wird, darüber hinaus hinreichend sicher identifizieren zu können, muss die Übertragungsfunktion zwischen Schallquelle und Mikrofonsonde möglichst glatt sein. In diesem Beitrag werden die für eine präzise trommelfellbezogene Messtechnik nötigen Anforderungen diskutiert.

Das Schallfeld im Gehörgang

Die allgemeinen Eigenschaften des Schallfeldes im Gehörgang wurden bereits im Vorfeld mit einem Finite-Elemente-Modell des Außenohrs untersucht (Hudde, Müller, DAGA 2005, Schmidt, Hudde, DAGA 2005). Dabei zeigte sich, dass der Druck nicht nur von der Position auf der Mittelachse des Gehörgangs abhängt, sondern auch dreidimensionale Variationen aufweist. Streng genommen sind damit die Voraussetzungen zur Anwendung eindimensionaler Schallfeldmodelle nicht erfüllt. Weitere Analysen ergaben, dass sich die Reflexionen, die durch den Flächenverlauf entstehen (und durch die Kettenparameter erfasst werden) mit den an den Biegungen des Gehörgangs entstehenden Reflektionen untrennbar vermischen. Die Ergebnisse legen nahe, dass mit Hilfe von Methoden, die auf eindimensionalen Modellen basieren, keine Informationen über die Gehörgangsgeometrie

gewonnen werden können. Es stellte sich allerdings heraus, dass die Punktübertragungseigenschaften im Gehörgang kaum vom Schallfeld abhängen. In der Praxis können Punktschalldrücke in guter Näherung mit hinreichend dünnen Mikrofonsonden gemessen werden. Die systematischen Messfehler (z.B. für die gesuchte Übertragungsfunktion) sinken dabei erwartungsgemäß, je weiter man sich dem Trommelfell nähert. Die naheliegende Strategie für den Trommelfellbezug besteht also einerseits darin, die Sonde möglichst weit in den Gehörgang einzuführen, damit das zu schätzende Übertragungsverhalten möglichst einfach wird. Andererseits wird statt der Geometrie des Gehörgangs direkt die Übertragungsfunktion zwischen Sondenspitze und Trommelfell geschätzt. Hierbei wird der innerste Punkt des Gehörgangs (der TMW) als Referenzpunkt genutzt. Es wurde bei den Simulationen darüber hinaus deutlich, dass der Unterschied zwischen dem Drücken an der Sondenspitze und im TMW mindestens bis zu 30 dB beim a priori unbekanntem $\lambda/4$ -Minimum betragen kann (vgl. Abb. 1). Eine Transformation des SONDENSCHALLDRUCKS ist also unbedingt notwendig.

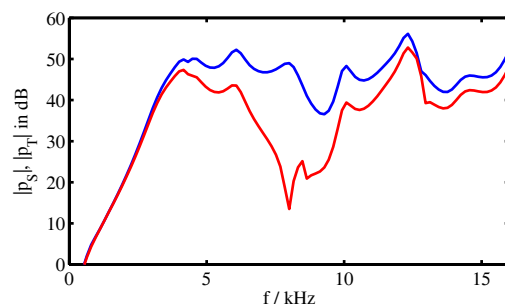


Abbildung 1: Schalldruck an der Sondenspitze (p_s , rot) und am Trommelfell (p_T , blau) bei Messung ca. 12 mm vor dem akustischen Abschluss des Gehörgangs.

Modellierung des Restgehörgangs

Im gemessenen Drucksignal zeigen sich charakteristische Minima, deren Frequenzen von der Sondenposition abhängen. Ein sehr einfaches Modell des Gehörgangsabschlusses ist als Zylinder mit dem Längenparameter $L = c/f_{min}/4$ zu implementieren, wobei c die Schallgeschwindigkeit im Gehörgang und f_{min} die aus der Messung bestimmte Minimalfrequenz repräsentieren (die Frequenz des Druckminimums kann - im Gegensatz zu seinem Betrag - recht gut gemessen werden). Somit wird das Schallfeld im Gehörgangsabschluss als dasjenige einer schallhart terminierten zylindrischen Leitung modelliert (das Trommelfell kann ab ca. 2-

4 kHz als schallhart betrachtet werden). Die gesuchte Übertragungsfunktion zwischen Sondenspitze und Trommelfell lautet $H = 1/\cos(\beta L)$ mit $\beta = \omega/c$. Mit zwölf unterschiedlichen Gehörgängen wurde das Modell durch Finite-Elemente-Simulationen überprüft. Es ergeben sich gute Übereinstimmungen zwischen dem durch das Modell geschätzten und dem simulierten Druck p_T (vgl. Abb. 2, gezeigt sind die Simulations- bzw. Schätzungsresultate von vier aus insgesamt zwölf simulierten Gehörgängen). Das Zylindermodell ist hierbei nicht als reales geome-

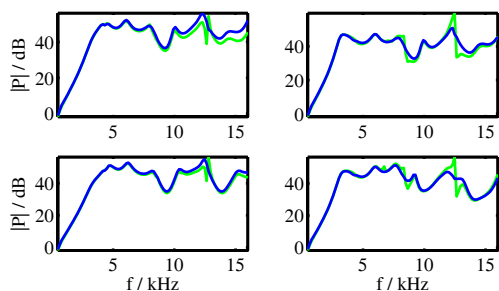


Abbildung 2: Schalldruck p_T im TMW (Simulation: blau, Schätzung mit Zylindermodell: grün).

trisches Äquivalent des Gehörgangs zu verstehen, dagegen wird eine Anpassung der Kettenparameter an die des Gehörgangs vorgenommen. Der Modellparameter L ist nicht mit der geometrischen Distanz zwischen Sonde und TMW identisch. So ergeben sich die aus den Minima abgeleiteten Parameter L für die Modelle in Abb. 2 jeweils 11, 12.2, 8.3 und 12.9 mm, während die zugehörigen Distanzen 15.2, 13.2, 9.8 und 13.2 mm betragen. L stellt die akustische Länge entlang des Weges, den die Welle im gegebenen Gehörgang bis zu dessen Abschluss zurücklegen muss, dar. Die wesentlichen Abweichungen bei der Schätzung entstehen durch die Konusform des Restgehörgangs. Die Impedanzminima weisen beim Zylinder und beim Konus ein Frequenzverhältnis von 1 : 3 bzw. 1 : 2 auf (vgl. Abb 3). Das im Gehörgang

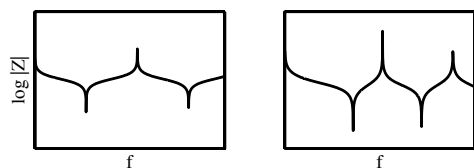


Abbildung 3: Qualitativer Verlauf der Eingangsimpedanz eines zylindrischen und eines konischen Leitungsstücks.

gemessene Verhältnis zwischen den ersten beiden Minimalfrequenzen kann also zum Entwurf eines verallgemeinerten Konusmodells genutzt werden, bei dem Länge und Öffnungswinkel variieren. Leider besteht zwischen diesen Größen und dem Frequenzverhältnis kein einfach erschließbarer mathematischer Zusammenhang, die Aufgabe kann jedoch robust iterativ gelöst werden. Ebenso kann die Abschlussimpedanz des Modells auf numerischem Weg so optimiert werden, dass sich eine möglichst glatte Übertragungsfunktion ergibt. Abbildung 4 zeigt das Ergebnis (für den ersten der vier Gehörgänge aus

Bild 2) einer Schätzung mit einem Konusmodell. Die Anpassung ab 8 kHz gelingt wesentlich besser. Das konische Modell bildet das Schallfeld im Restgehörgang für alle Frequenzen unterhalb des zweiten Minimums mit sehr geringen Abweichungen nach, da es dessen Kettenparameter praktisch exakt reproduziert.

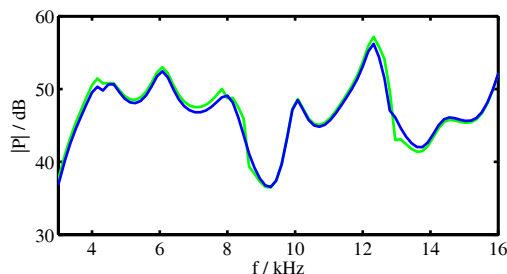


Abbildung 4: Beispiel Konusmodell: Schätzung von p_T im FE-Modell (vgl. Abb. 2 oben links, Simulation: blau, Schätzung mit Konusmodell: grün).

Quelleinfluss

Für die eindeutige Identifikation der Gehörgangsminka ist es wichtig, diese von den bereits im Quellschalldruck enthaltenen Minima trennen zu können. Solche können im Frequenzgang der Quelle, vor allem aber auch durch die Resonanzen innerhalb der Pinna auftreten. Bezieht man das mit der Sonde gemessene Signal auf den am schallhart verschlossenen Gehörgang unter Kopfhörerbeschallung auftretenden Druck $p_{ec,E}$, gelingt die Trennung zufriedenstellend (vgl. Abb. 5).

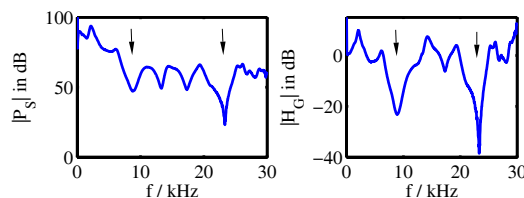


Abbildung 5: links: Schalldruckmessung (Sondenspitze), rechts: Übertragungsfunktion zwischen $p_{ec,E}$ und Sondenspitze. Das Minimum bei etwa 8 kHz wäre ohne den Bezug auf $p_{ec,E}$ nicht eindeutig identifizierbar.

Fazit

Die Genauigkeit von Messungen im Gehörgang, die auf den Signalen nur einer Mikrofonsonde basieren, kann durch die hier vorgestellten Verfahren auf sehr einfache Weise wesentlich verbessert werden. Dabei werden die Kettenparameter eines zylindrischen bzw. konischen Modells über die Druckminima an die Eigenschaften des Restgehörgangs angepasst. Die Methode ermöglicht es, den Trommelfellschalldruck gezielt einzustellen. Als zukünftige Anwendung ist die Messung von trommelfellbezogenen Isophonen geplant.